

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**LINHAS DE TRANSMISSÃO E DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS: ANÁLISE DE AVARIAS,
PERDAS TÉCNICO-FINANCEIRAS E
SISTEMAS DE PROTEÇÃO**

MARCUS VINÍCIUS ESTEVES SOARES DE MELO

Brasília, Dezembro de 2016.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

MARCUS VINÍCIUS ESTEVES SOARES DE MELO

**LINHAS DE TRANSMISSÃO E DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS: ANÁLISE DE AVARIAS,
PERDAS TÉCNICO-FINANCEIRAS E
SISTEMAS DE PROTEÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso de
graduação submetido ao Departamento
de Engenharia Elétrica da Universidade
de Brasília, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro
Eletricista.

Orientador: Dr. Prof. Alcides Leandro da Silva

Brasília, Dezembro 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Melo, Marcus Vinícius Esteves Soares

Linhas de Transmissão e Descargas Atmosféricas: Análise de Avarias, Perdas Técnico-Financeiras e Sistemas de Proteção [Distrito Federal] 2016.

VII 62p. 210X295mm. (ENE/FT/UnB. Engenheiro Eletricista, Engenharia Elétrica, 2016).

Trabalho de conclusão de curso - Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica. Brasília, 2016.

Orientação: Dr. Prof. Alcides Leandro da Silva.

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 1. Linha de Transmissão | 2. Descarga Atmosférica |
| 3. Alta Tensão | 4. Perdas |

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MELO, Marcus Vinícius Esteves Soares (2016). Linhas de Transmissão e Descargas Atmosféricas: Análise de Avarias, Perdas Técnico-Financeiras e Sistemas de Proteção [Distrito Federal] 2016.

Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 62p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Marcus Vinícius Esteves Soares de Melo.

TÍTULO DA MONOGRAFIA: Linhas de Transmissão e Descargas Atmosféricas: Análise de Avarias, Perdas Técnico-Financeiras e Sistemas de Proteção.

GRAU/ANO: Engenheiro Eletricista/2016.

É concedida a Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de conclusão de curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse trabalho de conclusão de curso pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Marcus Vinícius Esteves Soares de Melo

QSD 30 casa 32, Taguatinga Sul

72020-390 Taguatinga - Brasília, DF - Brasil

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LINHAS DE TRANSMISSÃO E DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: ANÁLISE DE AVARIAS, PERDAS TÉCNICO-FINANCEIRAS E SISTEMAS DE PROTEÇÃO

MARCUS VINÍCIUS ESTEVES SOARES DE MELO

Banca Examinadora

Prof. Alcides Leandro, UnB/ENE (Orientador) _____

Prof. Francisco Damasceno UnB/ENE _____

Prof. Pablo Cuervo, UnB/ENE _____

Brasília, Dezembro 2016

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais e aos meus irmãos, que sempre me apoiaram e me incentivaram.

Marcus Melo

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, que me abençoa e protege todos os dias de minha vida. Agradeço também a todos os que passaram por minha vida nos últimos 5 anos, e que de alguma forma contribuíram para meu crescimento pessoal, intelectual e profissional. Um agradecimento especial à todos os professores da Universidade de Brasília, que me ensinaram tanto durante minha passagem por aqui. Quero agradecer à minha mãe Alessandra, meu pai Ismar, meus irmãos Matheus e Louise, ao meu cunhado PH e aos meus avós, que sempre me deram todo o apoio e o incentivo que eu precisei. Por fim, quero deixar meus agradecimentos aos engenheiros que nos receberam e nos acompanharam na visita técnica à Subestação Samambaia, de FURNAS.

Marcus Melo

RESUMO

As descargas atmosféricas são fenômenos recorrentes no Brasil e em várias partes do mundo. Estas descargas estão sujeitas a incidir sobre os mais diversos elementos presentes na superfície terrestre, como árvores, pessoas, casas e linhas de transmissão. Este fato pode acarretar grandes danos a todos esses elementos, por causa da elevada potência carregada por esses fenômenos. Com foco na incidência de descargas atmosféricas sobre Linhas de Transmissão, esta monografia trata das avarias, perdas técnico-econômicas e prevenção relacionadas ao sistema elétrico. Construindo uma base teórica acerca desses dois tópicos principais, o trabalho faz uma análise crítica da incidência das descargas atmosféricas nas linhas de transmissão. A pesquisa constatou a importância atribuída a projetos bem elaborados das linhas de transmissão, com suas torres adequadamente aterradas e seus cabos de guarda, no enfrentamento das descargas atmosféricas. É um meio, portanto, de se preservar a qualidade e continuidade da transmissão de energia e segurança dos operadores e usuários.

ABSTRACT

Atmospheric discharges are recurrent phenomena in Brazil and in various parts of the world. These discharges are subject to influence on the most diverse elements present in the terrestrial surface, as trees, people, houses and transmission lines. This fact can cause great damage to all these elements, because of the high power charged by these phenomena. With focus on the incidence of atmospheric discharges on Transmission Lines, this monograph deals with the failures, technical-economic losses and prevention related to the electrical system. Constructing a theoretical basis on these two main topics, the paper makes a critical analysis of the incidence of atmospheric discharges in transmission lines. The research noted the importance attributed to well-designed transmission lines, with their adequately grounded towers and their guard cables, in the face of atmospheric discharges. It is a means, therefore, of preserving the quality and continuity of transmission of energy and safety of operators and users.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2. Estrutura do Trabalho	3
2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	5
2.1. Densidade de Descargas Atmosféricas pelo Mundo	5
2.2. Formação das Descargas Atmosféricas	8
2.3. Tipos de Descargas Atmosféricas	9
3. TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	11
3.1. Sistema de Transmissão Brasileiro	12
3.2. Tipos de Linhas de Transmissão	13
3.2.1. Linhas de Transmissão Quanto ao Tipo de Corrente	13
3.2.2. Linhas de Transmissão Quanto à Extensão	14
3.2.3 Linhas de Transmissão Quanto ao Nível de Tensão	15
4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICO-CONSTRUTIVAS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	16
4.1. Condutores	17
4.2. Isolantes	18
4.3. Estrutura	19
4.4. Cabos de Guarda	19
5. INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	21
5.1. Descargas Entre Nuvem e Solo	21
5.2. Parâmetros da Corrente de Descarga.....	22

5.3. Sobretensões, Transiente e Faltas	24
6. PROTEÇÃO DE LT CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS	27
6.1. Cabos de Guarda	27
6.2. Considerações de Projeto Para Mitigar a Incidência das Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão	30
6.3. Considerações de Projeto Para Mitigar os Efeitos das Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão	31
7. PERDAS TÉCNICO-FINANCEIRAS E AVARIAS	33
7.1. Diretrizes de Operação do Sistema de Transmissão	33
7.2. Perdas Técnico-Financeiras: Normas, Penalidades e Fiscalização.....	34
7.3. Avarias: Componentes Potencialmente Afetados Pelas Descargas Atmosféricas	35
7.4. Análise de Caso	37
8. CONCLUSÃO	41
8.1. Aspectos Gerais.....	41
8.2. Principais Conclusões Encontradas	41
8.3. Sugestões Para Trabalhos Futuros	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
ANEXOS	48
ANEXO A - Principais Trechos da Norma 63/2004 ANEEL.	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Linha de Transmissão [2].	1
Figura 2.1. Mapa de Densidade de Descargas Atmosféricas [6].	6
Figura 2.2. Formação de Carga nas Nuvens [4].	8
Figura 2.3. Tipos de Descargas Atmosféricas [9].	9
Figura 3.1. Visão Geral do Sistema Elétrico (Com adaptações) [10].	11
Figura 3.2. Sistema de Transmissão Brasileiro 2015 [12].	12
Figura 4.1. Linha de Transmissão 500 kV com Cabos de Guarda no Topo.	16
Figura 4.2. Cadeias de Isolantes em LT de 345 kV.	18
Figura 5.1. Parâmetros da Forma de Onda das Descargas Atmosféricas (Com adaptações) [21].	23
Figura 5.2. Ilustração de Descarga Atmosférica na Forma de Pulso de Corrente Incidindo em LT [23].	25
Figura 6.1. Cabo OPGW [27].	29
Figura 6.2. Arranjos Especiais Para Aterramento de Torres de LT [18].	32
Figura 7.1. Avaria em Isolador Devido a Corrente de Surto.	36
Figura 7.2. Distribuição das Causas dos Desligamentos Analisados [11].	38
Figura 7.3. LT 345 kV Corumbá /Brasília Sul GO/DF [31].	38

OBS: As figuras sem referência de fonte são do próprio autor deste trabalho.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Ranking de Descargas Atmosféricas no Mundo [7].....	7
Tabela 4.1. Características Típicas das LT [1].....	20
Tabela 5.1. Parâmetros da Corrente de Descarga [21].....	24
Tabela 7.1. Requisitos de Desempenho de uma LT a Descargas Atmosféricas [28]...	34
Tabela 7.2. Penalidades a Agentes de Transmissão [30].....	35
Tabela 7.3. Desligamentos na LT Corumbá /Brasília Sul [11].	39

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

DA: Descarga Atmosférica

LT: Linha de Transmissão

ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Com estruturas robustas e grandiosas, grandes cabos e componentes atrelados, é fácil identificar as linhas de transmissão (LT) na rede elétrica. São muito vistas ao se fazer viagens por meios rodoviários, por exemplo, pois estas se localizam principalmente fora do perímetro urbano, conectando a geração às localidades de distribuição [1].

Linhas de transmissão são portanto elementos de grande extensão, de altura elevada, predominantemente metálicos, localizados em áreas abertas, como mostrado na Figura 1.1. Tornando-se atrativos para descargas atmosféricas (DAs), as LTs podem sofrer desligamentos, sobretensões, interferências e etc. Afetando a qualidade da energia transmitida, os componentes dessas linhas e os trabalhadores que com elas lidam diretamente.



Figura 1.1. Linha de Transmissão [2].

O sistema elétrico como um todo sofre muito com intempéries. Nos Estados Unidos gastam-se entre 18 e 20 bilhões de dólares todos os anos em danos ao sistema elétrico causados por condições climáticas severas [3]. Descargas atmosféricas são apontadas como responsáveis pela interrupção no fornecimento de energia elétrica, mesmo em regiões onde esse fenômeno apresenta ocorrência moderada [4].

Há crescente preocupação, por parte das companhias que lidam com o sistema elétrico, em fornecer, e continuamente melhorar, a qualidade da energia elétrica, diminuir as perdas técnico-financeiras e consumidores cada vez mais exigentes. Esses fatores, em conjunto com os fatos elencados anteriormente, fazem com que as descargas atmosféricas e suas consequências no sistema tenham recebido atenção especial e crescente.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo apresentar a intersecção entre dois tópicos distintos, as descargas atmosféricas e o sistema elétrico, com ênfase no sistema de transmissão de energia. Adicionalmente, a pesquisa promove a análise técnico-financeira e de avarias em casos de desligamentos de linhas de transmissão causados por este fenômeno, como forma de aplicação de todo o conteúdo abordado. Formando, então, ao final, uma ferramenta teórica para uma análise crítica de casos de incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão, bem como ferramenta de conscientização para agentes do setor elétrico quanto aos riscos técnico-financeiros e de avarias.

1.2. Estrutura do Trabalho

O trabalho foi dividido em 8 capítulos.

O primeiro capítulo é a introdução. Nele estão as motivações que levaram a escolha deste trabalho, em especial as grandes perdas anuais advindas de condições climáticas, os objetivos desse trabalho e como este se encontra estruturado.

No segundo capítulo se encontra um estudo acerca das descargas atmosféricas. Fenômeno abundante e de características por vezes aleatórias, presente em todas as partes do mundo em diferentes densidades e intensidades. A frequência de ocorrência, sua formação e os principais tipos de descargas atmosféricas são também abordados.

O terceiro capítulo trata da transmissão de energia elétrica. Com ênfase no sistema elétrico brasileiro, este capítulo traz ainda as diferentes classificações das linhas de transmissão.

No capítulo 4, são apresentadas as características técnico-construtivas das linhas de transmissão. Ele contém um panorama teórico geral dos principais constituintes de uma linha de transmissão: os condutores, os isolantes, as estruturas e os cabos protetores.

O capítulo 5 é uma análise da correlação entre descargas atmosféricas e o sistema elétrico, com ênfase no sistema de transmissão. Das magnitudes e características dos parâmetros das correntes de descarga e como isso gera sobretensões, e podem vir a constituir um cenário de falta em uma linha de transmissão.

No capítulo 6, abordam-se as maneiras de proteger as linhas de transmissão das descargas atmosféricas. É feito um estudo sobre os cabos de guarda, elementos das linhas de transmissão com a finalidade de protegê-las contra este fenômeno. E ainda é feita uma análise de diferentes aspectos de projeto para mitigar a incidência e os efeitos que as descargas atmosféricas podem causar às linhas de transmissão.

O capítulo 7 contém uma análise crítica sobre avarias e perdas técnico financeiras que as descargas atmosféricas podem causar ao incidir sobre linhas de transmissão. Análise de normas do sistema elétrico brasileiro e suas diretrizes de operação, bem como das características das linhas de transmissão. E por fim, a análise de um caso real de desligamento em linhas de transmissão causado por descarga atmosférica ocorrido na linha Corumbá - Brasília Sul de 345 kV, pertencente ao sistema Furnas.

No último capítulo é feito um balanço de todo o trabalho executado. Reunindo toda a carga teórica e análises feitas em um texto que elenca as principais conclusões acerca do assunto, e traz um alerta aos agentes do setor elétrico sobre os perigos das descargas atmosféricas ao sistema de transmissão.

2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define em sua norma NBR 5419:2015 que descarga atmosférica é uma descarga elétrica de origem atmosférica entre uma nuvem e a terra ou entre nuvens, consistindo em um ou mais impulsos de vários quiloampères [5]. Fenômeno de características predominantemente desconhecidas e muitas vezes definidas como aleatórias, a descarga atmosférica é alvo de estudos em diversas áreas do conhecimento. Neste capítulo, as descargas atmosféricas serão abordadas de forma conceitual, com foco no que tange às linhas de transmissão.

2.1. Densidade de Descargas Atmosféricas pelo Mundo

Influenciada por diversos quesitos, a ocorrência de descargas atmosféricas está relacionada à um conjunto de fatores como a topologia do local, presença de corpos aquáticos, proximidade ao oceano, vento, temperatura, umidade. Por isso, observa-se que diferentes partes do globo, com suas características climáticas intrínsecas, apresentam variadas densidades de descargas atmosféricas. Até mesmo em uma única localidade em diferentes épocas do ano, a frequência da ocorrência desse fenômeno apresentará variações.

Por décadas, estudiosos investigam a densidade desse fenômeno pelo mundo. Baseado em 18 anos de dados (1995 a 2013), o *Earth Observatory* da agência espacial americana gerou um mapa que mostra a frequência de descargas atmosféricas pelo mundo [6], como ilustrado na Figura 2.1.

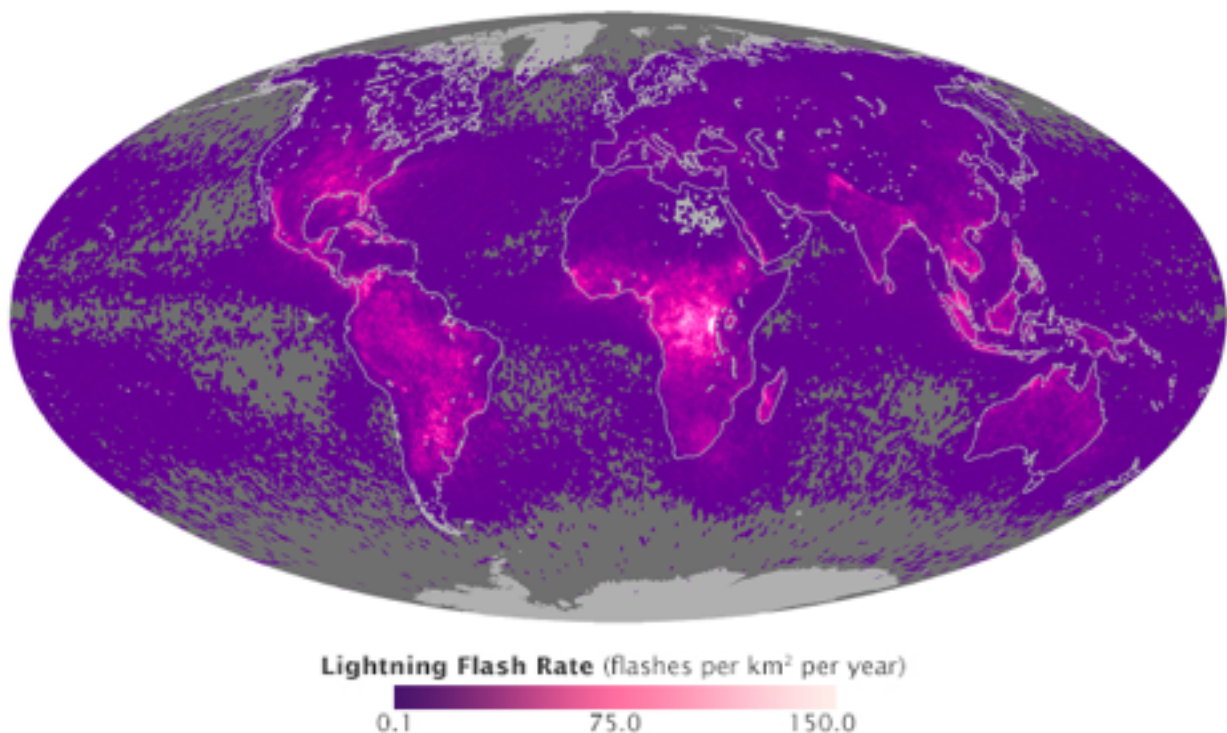


Figura 2.1. Mapa de Densidade de Descargas Atmosféricas [6].

Em 2016, a *American Meteorological Society* liberou um boletim escrito por vários pesquisadores que identifica por meio de um método de alta resolução os pontos de maior ocorrência de descargas atmosféricas na América do Sul, África, Ásia, América do Norte e Oceania. Este estudo revelou uma nova capital mundial de descargas atmosféricas. Devido a alta resolução da análise feita, a capital mundial das descargas atmosféricas que antes era Congo Basin, na África, agora é o Lago Maracaibo, localizado na Venezuela. A Tabela 2.1, a seguir, é uma adaptação de uma tabela em anexo à este boletim, mostra em resumo as 5 regiões de maior ocorrência de descargas atmosféricas nos 5 continentes mencionados. Essas regiões são delimitadas por quadrados imaginários de lado igual à 0,1 graus do comprimento da Terra, e são denominados de acordo com associações à localidades com mais de mil habitantes nestas delimitações [7]. No contexto geral por país, o Brasil se sobressai no cenário mundial (INPE).

Tabela 2.1. Ranking de Descargas Atmosféricas no Mundo [7].

Classificação	Densidade de Descargas Atmosféricas*	Local	País
América do Sul			
1	232.52	Lago Maracibo	Venezuela
4	172.29	Cáceres	Colômbia
7	138.61	El Tara	Colômbia
11	124.26	Norcasia	Colômbia
18	114.19	Majagual	Colômbia
África			
2	205.31	Kabare	Rep. Dem. do Congo
3	176.71	Kampene	Rep. Dem. do Congo
5	143.21	Sake	Rep. Dem. do Congo
8	129.58	Nguti	Camarões
9	129.50	Butembo	Rep. Dem. do Congo
Ásia			
6	143.11	Daggar	Paquistão
12	121.41	Rājauri	Índia
13	118.81	Doāba	Paquistão
22	108.03	Al Hadīyah	Yemen
28	104.59	Muree	Paquistão
América do Norte			
17	116.76	Patulul	Guatemala
29	103.23	Catarina	Guatemala
33	100.63	San Luis	Cuba
34	100.24	Chambellan	Haiti
37	99.39	San Jerónimo	Honduras
Oceania			
61	92.15	Derby	Austrália
83	86.75	Kununurra	Austrália
228	65.11	Derby	Austrália
308	59.69	Kununurra	Austrália
316	59.19	Ambunti	Papoa Nova Guiné

* Medido em descargas atmosféricas por quilômetro quadrado por ano.

2.2. Formação das Descargas Atmosféricas

Da teoria do eletromagnetismo, os materiais são classificados de acordo com suas propriedades elétricas. Baseado nisso, o ar é um material classificado como dielétrico, ou seja, um isolante. A diferença chave entre condutores e isolantes está na quantidade de elétrons livres nas camadas atômicas mais externas, o que possibilita a condução de eletricidade. Em dielétricos, portanto as cargas não são capazes de se movimentar livremente, pois há uma força finita que as impede. A menos que uma força externa, suficientemente intensa, seja aplicada [8].

Este é o princípio teórico base da formação das descargas atmosféricas. Sob a ação dos ventos, partículas de polaridades opostas são separadas em regiões da atmosfera. No geral, essa separação de cargas ocorre dentro das próprias nuvens. O caso mais comum é que as cargas negativas fiquem na parte inferior e as positivas na parte superior, conforme a Figura 2.2. Essas cargas promovem o surgimento de um campo elétrico, que pode ser entre duas regiões, tanto dentro da própria nuvem, quanto entre a nuvem e uma outra região no espaço [4].

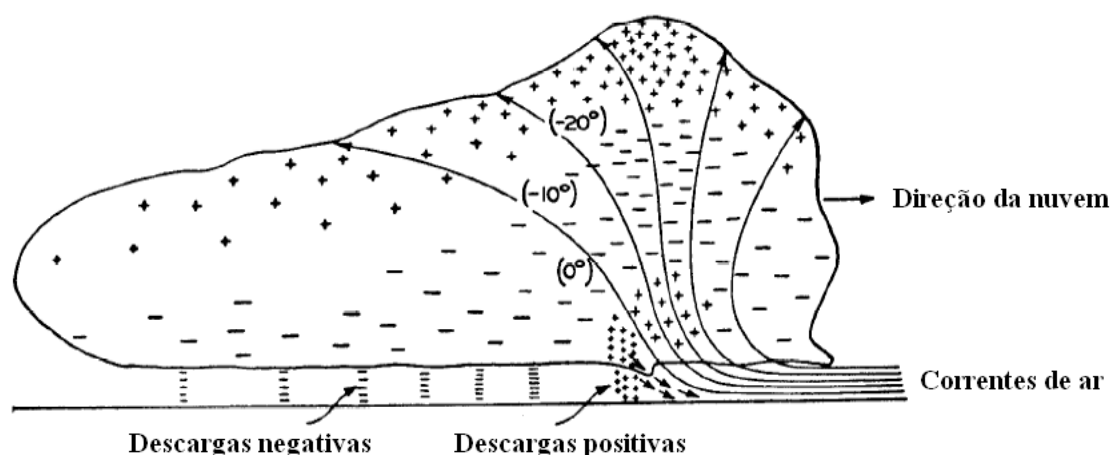


Figura 2.2. Formação de Carga nas Nuvens [4].

Se esse campo elétrico é suficientemente intenso, maior que o máximo campo elétrico que o dielétrico pode suportar (rigidez dielétrica), ocorre um fenômeno eletromagnético chamado ruptura dielétrica. A ruptura dielétrica é a transformação de um dielétrico em condutor por meio da aplicação de um campo elétrico capaz de liberar os elétrons dos átomos. Dessa forma, o meio passa a ser condutor, e o

campo elétrico externo empurra as cargas positivas no sentido do campo e as cargas negativas no sentido oposto [8]. Este movimento de cargas caracteriza o aparecimento de uma corrente elétrica. Corrente essa que, para descargas atmosféricas, é da ordem de quiloampères e atravessa centenas de metros em uma fração de segundos [4].

Para o dielétrico ar, a resistividade dielétrica é em média 3 MV/m. Isso significa que para que ocorra a ruptura dielétrica é necessária a ocorrência de um campo elétrico de intensidade maior ou igual a esse valor. Isso pode ocorrer em todos os tipos de dielétricos, e está vinculado à natureza do material, temperatura, umidade e do intervalo de tempo que o campo elétrico é aplicado [8].

2.3. Tipos de Descargas Atmosféricas

Existem dois grandes tipos de descargas atmosféricas de acordo com suas características espaciais. As descargas entre nuvem e solo e as descargas entre nuvem e nuvem. Onde o segundo grupo é o de maior frequência. A relação entre as frequências de ocorrência desses dois grupos varia de acordo com a posição no globo terrestre. Próximo aos polos, ocorrem 2 descargas do tipo nuvem-nuvem para cada descarga entre nuvem e solo, aproximadamente. Já nos trópicos essa relação é de aproximadamente 6 para 1 [4].

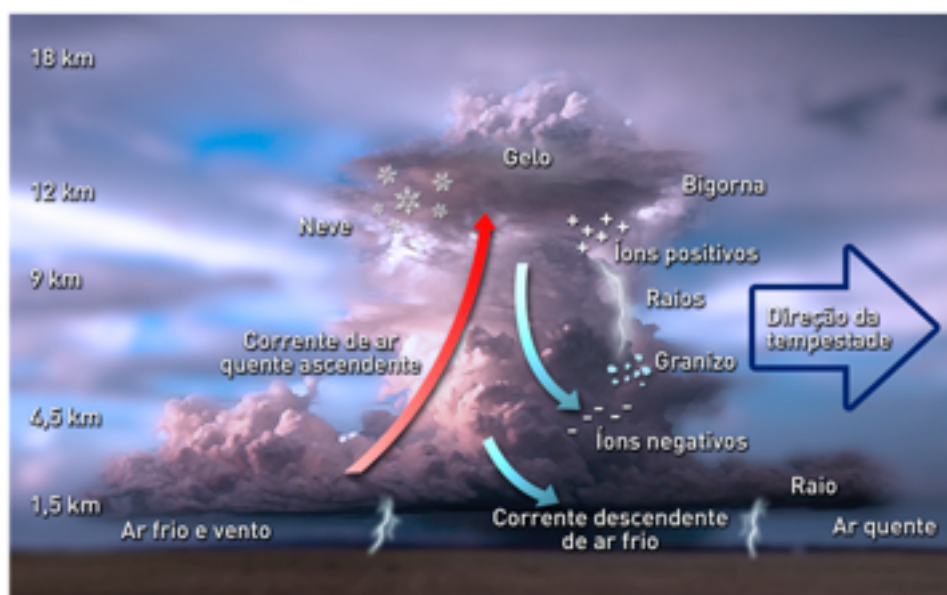


Figura 2.3. Tipos de Descargas Atmosféricas [9].

Analisando com mais detalhe as descargas entre nuvem e solo, que são as que mais interessam para esse estudo, é possível subdividi-la em vários grupos, de acordo com a carga e a direção da corrente: ascendentes positivas, ascendentes negativas, descendentes positivas, descendentes negativas. Vale ressaltar que em geral, as descargas ascendentes são associadas a estruturas muito altas no solo, enquanto as descendentes são associadas a estruturas não muito altas [4].

3. TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Em uma situação típica, uma estação de geração de energia gera eletricidade por algum dos vários métodos existentes. A tensão produzida é da ordem de 13 kV a 25 kV, em geral. O que não é apropriado para transmissão por longas distâncias. Entram em cena então transformadores que aumentam a tensão e reduzem a corrente, para diminuir as perdas no transporte dessa energia gerada [10]. As linhas de transmissão (LT) então têm a função de transportar a energia elétrica de onde foi produzida até os centros de distribuição, onde ela será entregue aos consumidores finais. Esta situação se encontra ilustrada na Figura 3.1.

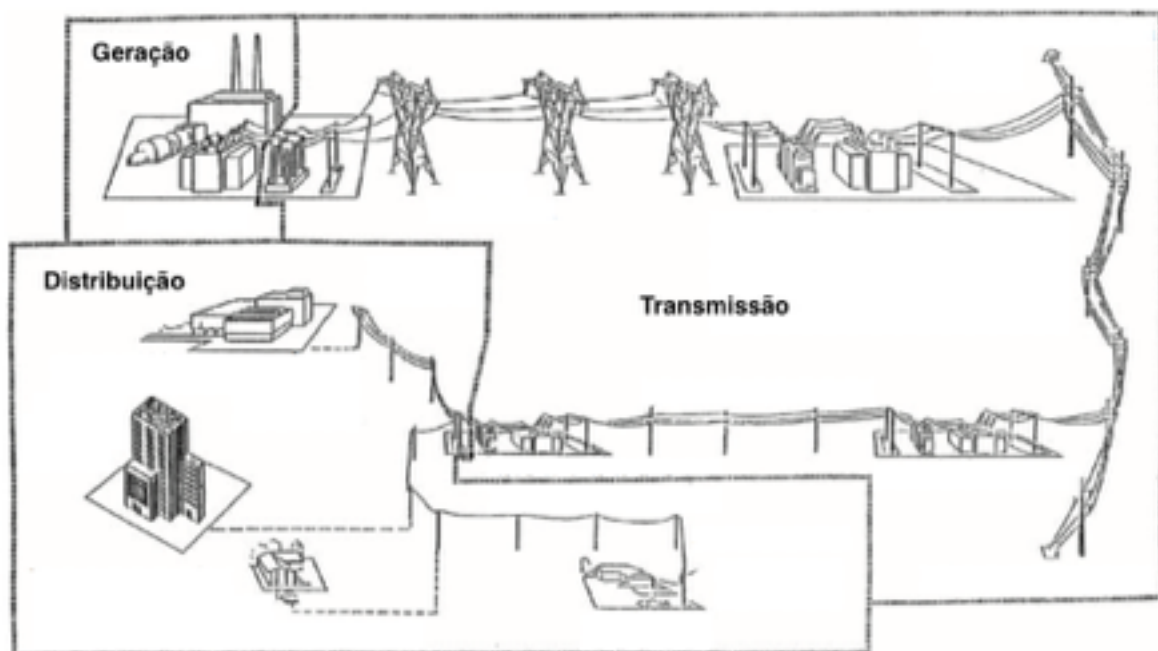


Figura 3.1. Visão Geral do Sistema Elétrico (Com adaptações) [10].

O projeto de linhas de transmissão têm evoluído para proporcionar melhor desempenho, visando uma transmissão de forma mais eficiente, com menos perdas, mais resistentes ao tempo, às intempéries e aos fenômenos naturais, de mais fácil manutenção, construção, menor custo, entre outros. Este capítulo trata das linhas de transmissão, seus parâmetros técnicos e construtivos, e os tipos de linhas de transmissão.

3.1. Sistema de Transmissão Brasileiro

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, o sistema de transmissão no Brasil em 2015, Figura 3.2, era composto por linhas de corrente contínua e alternada, de tensões entre 138 até 800 kV, ligando geração e consumo. Totalizando um montante aproximado de 130.000 km de linhas e potência de transformação de mais de 320.000 MVA [11].

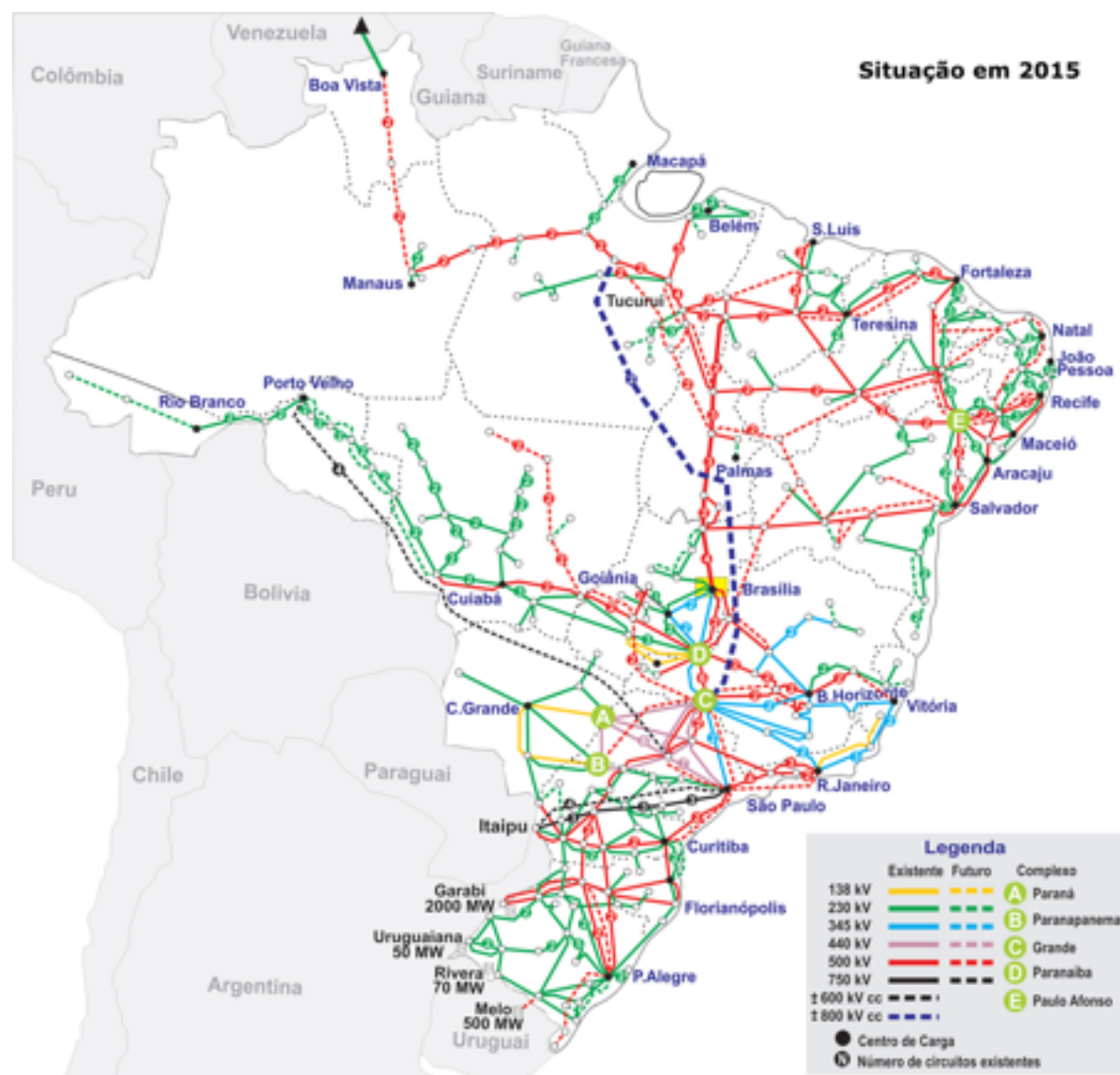


Figura 3.2. Sistema de Transmissão Brasileiro 2015 [12].

De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, esse sistema conta atualmente com a presença de 104 agentes. Dentre eles FURNAS - Furnas Centrais Elétricas S.A., Eletronorte - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A., CHESF - Companhia Hidrelétrica do São Francisco, que desempenham papéis no sistema de transmissão do Brasil em diferentes regiões [13].

3.2. Tipos de Linhas de Transmissão

São consideradas linhas de transmissão, condutores projetados para transmitir energia por longas distâncias com pequenas perdas e distorções. Em geral, as linhas de transmissão operam em tensões superiores a 100 kV, podendo chegar até níveis superiores a 1000 kV, como em algumas linhas de UHV DC (*Ultra High Voltage Direct Current*) construídas na Ásia. Pode-se classificar as linhas de transmissão de acordo com diversas características, as mais comuns são: quanto ao tipo de corrente e quanto à extensão.

3.2.1. Linhas de Transmissão Quanto ao Tipo de Corrente

Quanto à modalidade da corrente, as LT podem ser linhas de transmissão de corrente contínua (CC) ou linhas de transmissão de corrente alternada (CA). Ambos os tipos tem características peculiares, que os tornam mais apropriados para determinadas aplicações.

Linhas de transmissão CC são usadas geralmente quando há uma interconexão assíncrona, ou altos níveis de reatância são esperados por causa do meio (como no caso de transmissão subaquática). Este tipo é ainda recomendado para transmissões a longas distâncias. Neste caso usa-se não apenas corrente contínua como também níveis de tensão muito mais altos (UHV CC), pois minimiza as perdas e os custos de projeto. Em contrapartida, linhas de transmissão CC necessitam de conversor, apresentam estrutura de maior altura e condutores de maior bitola (mais caros) [10].

As linhas de transmissão CA são as mais comuns. Este tipo de linha tem comportamento melhor quanto a perdas para níveis de tensão não tão altos. Não necessitam de estruturas tão grandiosas e no geral fazem uso de maior número de condutores que em uma linha de transmissão CC.

3.2.2. Linhas de Transmissão Quanto à Extensão

À título de análises matemáticas, simulações e modelagens, é rotineiro classificar e subdividir as linhas de transmissão de acordo com seu comprimento. Essa classificação se dá pelas diferentes aproximações passíveis à modelagem das linhas de transmissão de acordo com sua extensão. As linhas de transmissão são modeladas conhecendo seus parâmetros elétricos por fase e seu comprimento [14].

São chamadas linhas curtas aquelas de comprimento inferior a 80 quilômetros. As linhas médias estão entre 80 e 200 quilômetros. E as linhas longas são as de mais de 200 quilômetros de comprimento. Na modelagem, as linhas curtas são representadas por um circuito constituído pela resistência equivalente dos condutores em série com a reatância indutiva. Já as linhas médias são modeladas por um circuito π (pi) equivalente, que é basicamente o circuito para linhas curtas acrescido de uma susceptância capacitiva da fase para a referência dividida em duas partes, alocadas em cada um dos terminais da linha. E por fim, as longas são representadas por um modelo semelhante ao de uma linha média, com abordagem por parâmetros distribuídos. Uma descrição mais detalhada dessas modelagens podem ser encontrados em materiais que tratam da análise de linhas de transmissão como em [14, 15].

A linha de transmissão de maior extensão no mundo está localizada no Brasil. É a chamada Linha de Transmissão do Rio Madeira, que conecta as regiões norte e sudeste do país por uma extensão de 2.385 km. Trata-se de uma linha HVDC cujo nível de tensão é de 600kV. As outras 4 linhas de transmissão que completam as 5 maiores do mundo, são, em ordem decrescente: Jinping-Sunan, na China, uma linha UHVDC de 800kV e 2.090 km de extensão; Xiangjiaba-Shanghai, na China, UHVDC de 800kV com 1980 km de comprimento; Inga-Kolwezi, no Congo, HVDC

de 500kV de 1.700 km de extensão; e Talche-Kolar, na Índia, HVDC de 500kV com 1.450 km de comprimento [16].

3.2.3 Linhas de Transmissão Quanto ao Nível de Tensão

As linhas de condução de eletricidade podem ainda ser classificadas quanto ao seu nível de tensão. Segundo a ANEEL, em sua Norma Técnica 0075/2011-SRD/ANEEL de dezembro de 2011, tensões nominais são padronizadas para diferentes camadas do sistema energético.

Segundo a norma, linhas de distribuição secundárias apresentam níveis de tensão de 380/220 e 220/127 volts em redes trifásicas, e 440/220 e 254/127 volts em redes monofásicas. E ainda, que a distribuição primária ocorre em níveis de 34,5 e 13,8 kV. E por fim, que as linhas de transmissão e subtransmissão tem tensões nominais de 750, 500, 230, 138, 69 34,5 e 13,8 kV [17].

Especificamente para as linhas de transmissão, é corriqueiro encontrar na literatura designações para diferentes grupos de tensões. Mas no geral verifica-se um padrão na utilização dessas designações. Usa-se o termo alta tensão de transmissão tensões para se referir a linhas de tensão nominal entre 100 kV e 230 kV, já o termo extra alta tensão é utilizado para tensões menores que 800 kV, e, por fim, ultra alta tensão é utilizado para designar linhas com nível maior ou igual a 800 kV [10].

4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICO-CONSTRUTIVAS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Ao se projetar uma linha de transmissão, é necessário observar uma série de componentes que as constituem. Tais componentes apresentam particularidades relacionadas ao uso, tipo, nível de tensão, relevo e até ao clima do local por onde a linha de transmissão passará. Os principais componentes estão ilustrados na Figura 4.1, e são eles: os condutores, isolantes, estrutura e cabos de guarda.

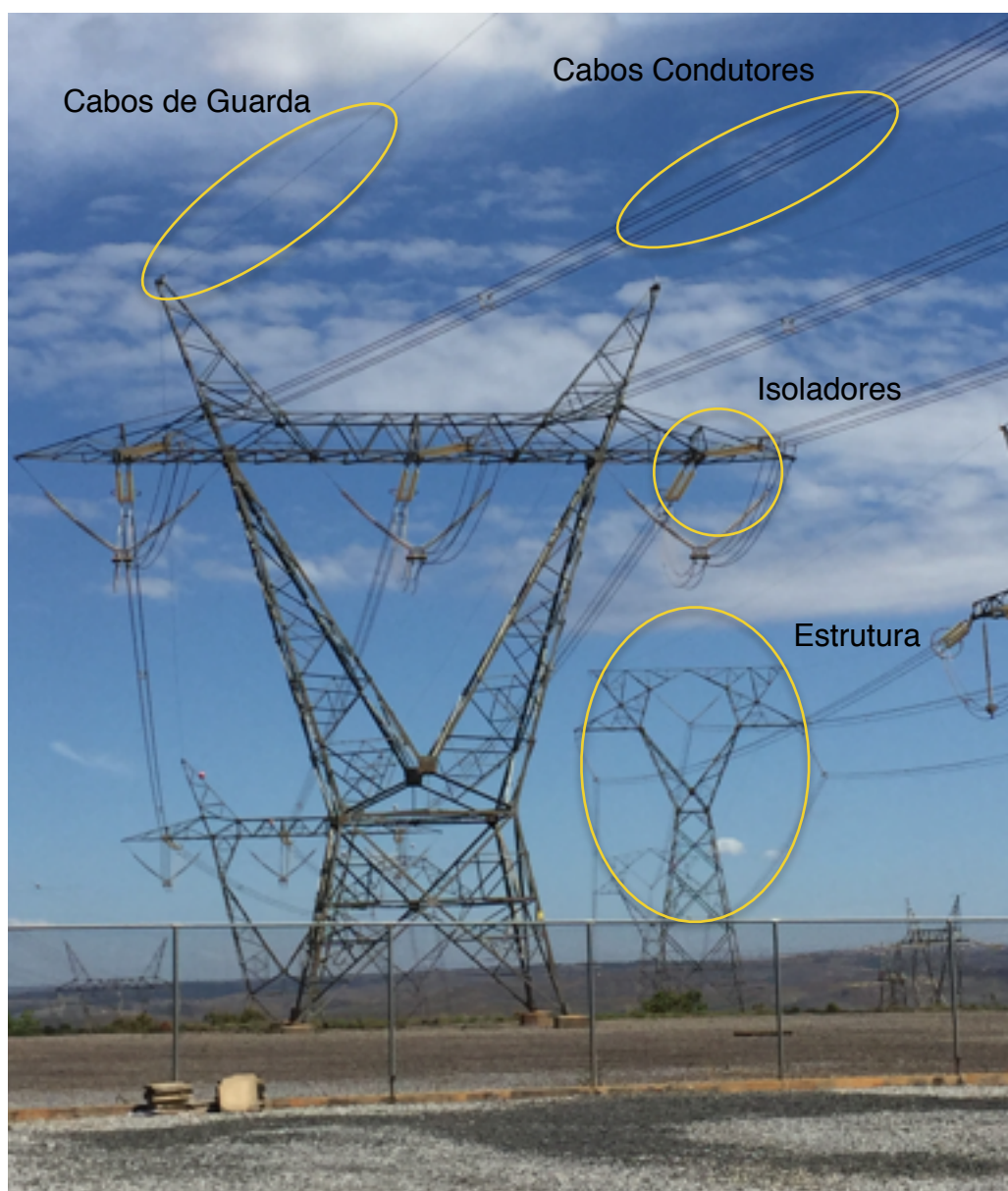


Figura 4.1. Linha de Transmissão 500 kV com Cabos de Guarda no Topo.

4.1. Condutores

Fundamentais às linhas de transmissão, os condutores representam grande parte dos custos envolvidos na construção das linhas. Em alguns casos podem ser usados centenas de milhares de metros desse componente que tem como principal função formar o circuito elétrico por onde a corrente vai passar desde a sua geração até a localidade de distribuição. Existem duas características principais referentes aos condutores que devem ser observadas no projeto de linhas de transmissão: a quantidade de condutores por fase e o material/estrutura do condutor.

A quantidade de condutores por fase é variável dependendo do projeto. Tal característica pode ser usada para controlar o efeito corona e a reatância da linha. O efeito corona é a ionização do ar em volta dos condutores, fazendo surgir um campo elétrico ali. O efeito corona causa perdas por meio de emissão de luz e ruídos. Utilizar mais de um condutor por fase implica em menor reatância e um campo elétrico mais fraco na superfície do condutor, reduzindo o efeito corona. [1, 18]

Os condutores são constituídos de metais e têm composição e estrutura variadas. No passado, o mais comum era se ter condutores sólidos de cobre. Hoje em dia, condutores de alumínio são mais frequentemente encontrados, uma vez que o alumínio se mostrou como uma alternativa de custo baixo e boa relação de perdas na condução, se comparado a outros elementos. Os condutores utilizados em linhas de transmissão são geralmente denominados por uma sigla, que traduz sua constituição e estrutura. O ACSR, por exemplo, se trata de um dos tipos mais utilizados. Sua nomenclatura refere-se a *Aluminium Conductor Steel Reinforced*, que pode ser traduzido por Condutor de Alumínio Reforçado com Alma de Aço [1].

4.2. Isolantes

Discos ou séries de discos, em geral constituídos de porcelana ou polímero, são usados para sustentar cabos e fornecer a isolação para a estrutura da linha de transmissão. Existem diferentes tipos de discos, que oferecem diferentes níveis de isolação, peso e resistência mecânica. Quanto maior for a tensão carregada por certa linha, maior é o número de discos de porcelana utilizados em cada série. Na Figura 4.2 é possível observar várias cadeias de discos isolantes (isoladores) em uma linha de transmissão de 345 kV ao lado da subestação Samambaia, de FURNAS.



Figura 4.2. Cadeias de Isolantes em LT de 345 kV.

4.3. Estrutura

Dada a topologia, tensão transmitida, requisitos do projeto, limitações econômicas e condições climáticas, diferentes tipos de estrutura podem ser empregadas para sustentar os cabos das linhas de transmissão. Existem diversos tipos de estruturas para linhas de transmissão, por vezes também denominadas torres [1].

O projeto das estruturas da linha de transmissão leva em conta ainda um fator chamado faixa de servidão. Essa faixa consiste em uma área sob a estrutura e cabos que delimita um perímetro de segurança onde não deve haver vegetação de grande porte e o tráfego de pessoas e animais deve ser evitado, a fim de manter o bom funcionamento do sistema de transmissão, bem como a segurança dessas pessoas e animais [19].

4.4. Cabos de Guarda

Existe um componente associado ao projeto de linhas de transmissão que é responsável pela proteção dos condutores contra descargas atmosféricas. Os cabos de guarda, ou cabos protetores, são uma estrutura de cabos, em geral mais finos que os usados nos condutores das fases, localizados na parte superior da estrutura e dispostos de forma a proteger os condutores contra a incidência de descargas atmosféricas. Os cabos protetores são aqueles fixados às estruturas e a elas solidários eletricamente. Esses cabos são aterrados, fornecendo o caminho de dissipação para as descargas atmosféricas que os atingem.

Nestes cabos observa-se, em alguns casos, a presença de uma esfera em geral de cor alaranjada. Esse equipamento tem a função de sinalização. É empregado em localidades com tráfego de aeronaves e equipamentos agrícolas, para reforçar a visibilidade da linha de transmissão e evitar acidentes [20].

Todos os fatores acima estão relacionados entre si. Muitos deles dependem dos outros e de fatores em comum. A Tabela 4.1 apresenta um apanhado geral sobre características típicas de cada um desses componentes para diferentes níveis de tensão de transmissão.

Tabela 4.1. Características Típicas das LT [1].

Tensão Nominal (kV)	Condutores de Fase				
	Número de condutores por fase	Área de seção do ACSR por condutor (kcmil)	Espaçamento entre os conjuntos de condutores (cm)	Espaçamento mínimo	
				Espaçamento fase-fase (m)	Espaçamento fase-terra (m)
69	1	—	—	—	—
138	1	300-700	—	4 a 5	—
230	1	400-1000	—	6 a 9	—
345	1	2000-2500	—	6 a 9	7.6 a 11
345	2	800-2200	45.7	6 a 9	7.6 a 11
500	2	2000-2500	45.7	9 a 11	9 a 14
500	3	900-1500	45.7	9 a 11	9 a 14
765	4	900-1300	45.7	13.7	12.2
Tensão Nominal (kV)	Isoladores		Cabos de Proteção		
	Número de linhas de isoladores por fase	Número de discos por linha de isoladores	Tipo	Número de cabos	Diâmetro (cm)
69	1	4 a 6	Aço	0, 1 ou 2	—
138	1	8 a 11	Aço	0, 1 ou 2	—
230	1	12 a 21	Aço ou ACSR	1 ou 2	1.1 a 1.5
345	1	18 a 21	Fibras de Alumínio	2	0.87 a 1.5
345	1 ou 2	18 a 21	Fibras de Alumínio	2	0.87 a 1.5
500	2 ou 4	24 a 27	Fibras de Alumínio	2	0.98 a 1.5
500	2 ou 4	24 a 27	Fibras de Alumínio	2	0.98 a 1.5
765	2 ou 4	30 a 35	Fibras de Alumínio	2	0.98

5. INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Conforme foi visto no capítulo 1 deste trabalho, as descargas atmosféricas são fenômenos de natureza predominantemente aleatória, que podem ocorrer entre nuvens ou entre nuvem e solo. Apesar de o primeiro ser o que ocorre com mais frequência, o segundo é o que merece maior atenção neste estudo, uma vez que ele é o que pode incidir nas linhas de transmissão, e a elas causar danos.

5.1. Descargas Entre Nuvem e Solo

Dentro do grupo de descargas entre nuvem e solo, é possível definir vários subtipos de acordo com a direção e a polarização da corrente de descarga. Existem as chamadas descargas descendentes positivas, as descargas descendentes negativas, as descargas ascendentes positivas e as descargas ascendentes negativas. Onde os termos ascendentes e descendentes designam a direção do precursor de carga, isso é, de onde parte a corrente. Isso porque no fenômeno das descargas atmosféricas, um impulso parte e, ao chegar próximo ao seu destino, um outro impulso contrário ao primeiro surge para fechar o circuito.

As descargas ascendentes, positivas e negativas, são associadas a estruturas muito altas, da ordem de centenas de metros de altura. Já as descargas descendentes, são associadas a estruturas mais baixas, da ordem de dezenas de metros de altura, e dentro dessas estruturas estão as linhas de transmissão. Somente aproximadamente 10% das descargas atmosféricas descendentes são positivas [4]. Grigsby, de forma ainda mais direta, afirma que é a primeira corrente de retorno de uma descarga atmosférica descendente negativa que oferece o maior risco aos componentes dos sistemas elétricos de potência [10]. De acordo com o IEEE Padrão 1410-1997, baseado em dados meteorológicos, a atividade de descargas atmosféricas descendentes é dada pela equação 5.1. Onde TD é o número de dias com descargas atmosféricas por ano, e GFD é o número de primeiras correntes de retorno de descargas atmosféricas descendentes por quilômetro quadrado por ano.

Com base nos dados históricos de descargas atmosféricas o GFD tem um desvio padrão relativo de 30% [21].

$$GFD = 0,04 \cdot TD^{1,25} \quad (\text{Eq. 5.1.})$$

A partir de uma grande concentração de cargas negativas na região inferior da nuvem, eventualmente o campo elétrico em algum ponto dessa região ultrapassa a rigidez dielétrica do ar, originando canais ionizados com a progressão de impulsos que progridem, permitindo o deslocamento das cargas. Essa progressão se dá a uma velocidade da ordem de 1.000.000 m/s, cada canal possui forma retilínea e duração de 25 a 50 μ s. Nesses avanços podem haver mudanças de direção e ramificações podem terminar no ar. A partir do solo ou objetos de altura da ordem de até algumas dezenas de metros surge um campo elétrico alto o suficiente para gerar canais ascendentes de carga positiva. Se for estabelecida a conexão desses canais, o resultado é um canal condutor, que será percorrido por uma corrente de magnitude e velocidade elevadas. Essa corrente é a chamada corrente de retorno e é marcada por intensa luminosidade e estrondo, que ocorre por causa da expansão do ar na região devido ao aquecimento [4].

Grisby apresenta os resultados da análise da incidência desse tipo de descarga em um único condutor de uma linha aérea. Essa análise levou a uma expressão que aproxima número de incidências (N_s) sobre um condutor por 100 km de comprimento por ano. Onde h é a altura média da linha em metros [10].

$$N_s = 3,8 \cdot GFD \cdot h^{0,45} \quad (\text{Eq. 5.2.})$$

5.2. Parâmetros da Corrente de Descarga

Dentro do contexto deste trabalho, faz-se necessário então entender as magnitudes e peculiaridades do deslocamento de carga nesse fenômeno para compreender os efeitos que podem ser causados em situações diversas que o envolvem. Os principais parâmetros que caracterizam a corrente das descargas atmosféricas são

a sua forma de onda, amplitude máxima, polaridade, tempo de frente de onda, tempo de meia onda, e derivada máxima da corrente em relação ao tempo [4].

A amplitude máxima é definida como o valor de pico da corrente de descarga. Sua unidade é dada em kA. Para esse parâmetro é considerada uma média global de 30 kA de magnitude, podendo em casos extremos atingir valores da ordem de 400 kA, de acordo com registros em torres de medição [22]. O tempo de frente de onda ($T_{10/90}$), em μs , pode ser definido como o intervalo de tempo entre os pontos onde a corrente vale 10% e 90% do seu valor de pico. O tempo de meia onda (T_{mo2kA}), em μs , é o tempo entre o instante em que a corrente vale 2 kA até o instante em que ela vale 50% do seu valor de pico. E por fim, a derivada da corrente em relação ao tempo ($\frac{dI_o}{dT_{10/90}}$), em kA/ μs [4]. O IEEE, em seu Padrão 1410-2004, também aborda e

define esses conceitos. A Figura 5.1 está contida nesse documento e ilustra esses parâmetros da corrente de descarga graficamente.

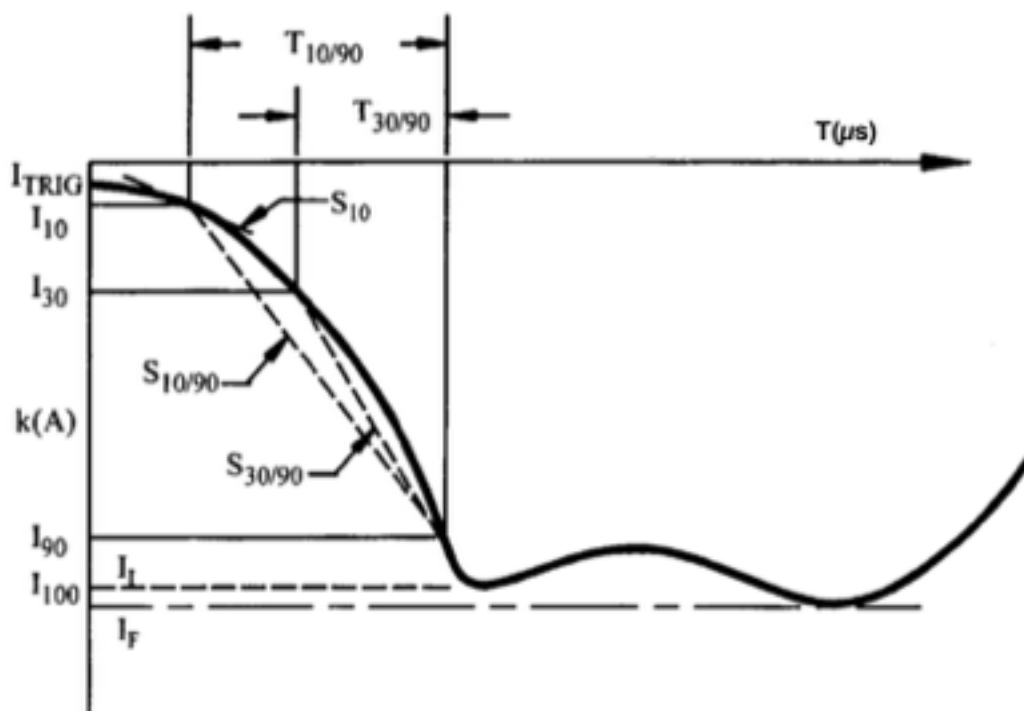


Figura 5.1. Parâmetros da Forma de Onda das Descargas Atmosféricas (Com adaptações) [21].

Com base em coletas de dados, experimentos e análises executadas por diversos estudiosos, notou-se a característica aleatória destes, com grande dispersão estatística. E com isso, assumiu-se que eles seguem uma distribuição log-normal. [4] [21] Esta distribuição tem a seguinte função densidade de probabilidade:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \beta \cdot x}} \cdot e^{-\frac{\ln(x/M)}{2 \cdot \beta}} \quad (\text{Eq. 5.3.})$$

onde M é a média, β é o desvio padrão logarítmico. Os valores de M e β diferem dentre vários estudos encontrados na literatura [4]. Na Tabela 3.1 encontra-se os valores adotados pelo IEEE em seu Padrão 1410-1997 para a primeira corrente de retorno.

Tabela 5.1. Parâmetros da Corrente de Descarga [21].

Parâmetro	Mediana	Desvio Padrão
I ₀	31,1	0,484
t _{10/90}	5,63	0,576
t _{mo}	1,28	0,611
dI ₀ /dt	5,0	0,645

Vale ressaltar que tais definições são advindas de um conjunto de medições, e que se trata de um evento com muita interferência de fatores externos. O relevo ou objetos próximos podem atrair parte da descarga, por exemplo. Estes resultados portanto são aproximações, que muitas vezes não condizem exatamente com as características das descargas em toda a região.

5.3. Sobretensões, Transiente e Faltas

Descargas atmosféricas descendentes são as maiores causas de interrupção no fornecimento em linhas de distribuição e transmissão. Com base em dados de linhas de transmissão na região da América do Norte, esse tipo de fenômeno é o

responsável por 26% das interrupções no fornecimento em linhas de até 230 kV, e 65% nas linhas de até 345 kV [1].

Em sistemas elétricos de potência, grande causa dos desligamentos não programados em linhas são as descargas atmosféricas. Os três principais mecanismos de desligamento por descarga atmosférica, são eles o *flashover*, *blackflashover* e ruptura de meio vão, detalhados a seguir [23].

O distúrbio na linha de transmissão surge como uma onda de corrente e tensão que se divide em duas e viaja pela linha, como ilustrado na Figura 5.2. Onda essa que se reflete nos terminais, encontrando e fazendo sobreposição e se distorcendo com onda incidente. Devido às perdas da linha, essas ondas vão sendo atenuadas ao se propagarem. Este período de estabilização dos níveis de tensão e corrente da linha é o chamado transiente. Tal incidência e reflexões podem fazer com que o nível de tensão ultrapasse os níveis suportados pelos equipamentos do sistema elétrico de potência [1].

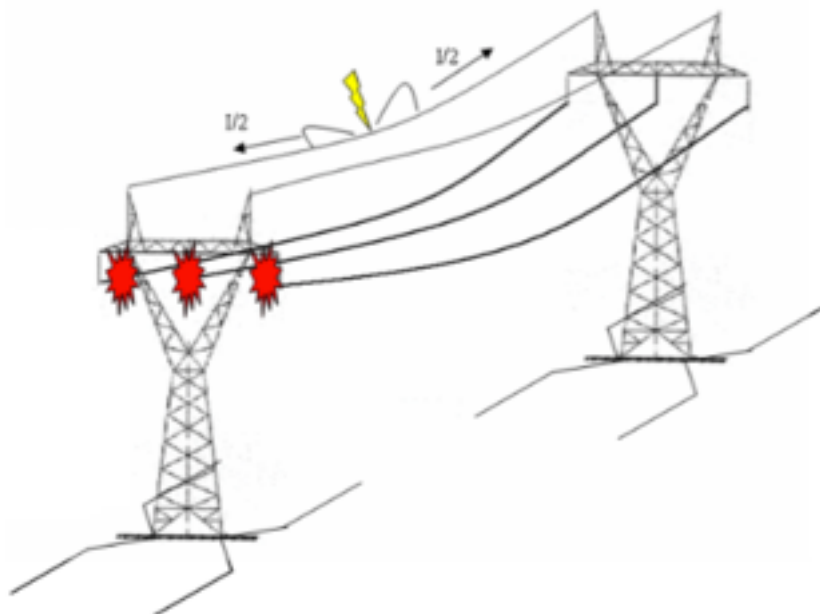


Figura 5.2. Ilustração de Descarga Atmosférica na Forma de Pulso de Corrente Incidindo em LT [23].

No *flashover* ocorre a incidência direta da descarga atmosférica nos condutores da linha de transmissão. Seja por falha, erro de projeto ou falta dos cabos de proteção. Tal cenário acarreta em sobretensão nos condutores, que pode ser maior que o que os isoladores podem suportar, provocando uma falha no isolamento da primeira estrutura aterrada que as ondas de surto atingem. Nesse caso ocorre um curto-circuito entre fase terra [23].

O *blackflashover* é o caso em que a descarga atmosférica incide nos cabos de guarda ou estrutura da torre (Figura 5.2). Os cabos de guarda são equipamentos muito utilizados e sua principal função é a prevenção de *flashovers*. A corrente de surto e a sobretensão, causadas pela descarga atmosférica, percorrem os cabos de proteção, bem como estrutura da torre e terra, se ramificando, interferindo e sobrepondo. A sobretensão resultante nesse caso também pode atingir níveis não suportados pelos isoladores (nível de isolamento), com referência às tensões de fase, provocando o curto-circuito entre fase e terra [23].

Vale ressaltar ainda, que a intensidade das sobretensões não são afetadas significativamente pela magnitude da tensão na linha. Portanto, para linhas de transmissão com tensões superiores a 345 kV, a influência desse fenômeno é considerada de menor importância [1].

A incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão resulta portanto em uma falta. A falta é caracterizada pela falha no isolamento, nesse caso devido à uma sobretensão inesperada, ou maior que a esperada. A falta se trata então de um curto-circuito, e sua corrente está relacionada à impedância do sistema entre os geradores e a falta. Essa corrente de falta pode apresentar magnitude de ordem muito elevada em comparação com a corrente normal de operação do sistema. Situação essa um tanto quanto recorrente em cenário de falta. Tal corrente fluindo por muito tempo pelo sistema pode vir a causar danos térmicos e até mecânicos (no caso de enrolamentos, por exemplo) aos equipamentos por onde passa, especialmente se a existência dessa corrente no sistema for por um período prolongado [1].

6. PROTEÇÃO DE LT CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As descargas atmosféricas oferecem portanto um sério risco à transmissão segura e eficiente de energia elétrica. Suas características aleatórias e altíssimas magnitudes de corrente e velocidade, tornam este fenômeno de grande perigo para o transporte de eletricidade em padrões aceitáveis, que não ofereça risco à equipamentos do sistema elétrico de potência, à equipamentos do consumidor final ou a qualquer ser ou entidade que, de alguma forma, possa vir a ser afetado por essa situação.

Neste contexto, este capítulo apresenta uma análise acerca da proteção das linhas de transmissão ou a atenuação dos efeitos e incidência das descargas atmosféricas nas mesmas, necessários para que não culmine em tais danos físicos e financeiros. Será feita uma abordagem mais aprofundada sobre os cabos de guarda, principal forma de proteção de linhas de transmissão contra descargas atmosféricas. E ainda, serão analisados fatores de projeto que visam mitigar os efeitos das descargas atmosféricas incidentes, bem como fatores de projeto que visam diminuir a incidência das descargas nas linhas de transmissão, com base principalmente na norma IEEE Padrão 1243 [24], que apresenta as principais escolhas de projeto de linha de transmissão que podem melhorar o comportamento da linha com relação às descargas atmosféricas.

6.1. Cabos de Guarda

No projeto de linhas de transmissão, a principal preocupação está no âmbito econômico, uma vez que a linha deve conectar dois pontos e transportar energia de acordo com os requisitos impostos pelos órgãos reguladores, com o menor custo possível. Portanto, fatores como o comprimento da linha, custos de materiais e de construção, isolamento e perdas na linha são de grande peso neste primeiro momento. Porém, deve-se atentar também à proteção contra descargas atmosféricas, pois os efeitos destas podem levar a colapsos na linha e grandes perdas técnico-financeiras dado o poder desse fenômeno.

As linhas de transmissão são dispositivos de grande extensão e altura elevada, geralmente bem mais alta que os demais objetos ao seu redor. São ainda dispositivos compostos geralmente por uma grande quantidade de materiais condutores. Todos esses elementos levam a uma grande probabilidade de que este componente seja constante alvo de descargas atmosféricas.

Uma descarga direta a um cabo condutor de uma linha de transmissão tem elevadas chances de provocar uma falha no isolamento, formando um arco entre a estrutura aterrada e a fase, acarretando em um curto-circuito. Dessa forma, o mecanismo de proteção das linhas de transmissão contra descargas atmosféricas são os cabos de guarda, também chamados de cabos para-raios.

A presença de tais cabos de proteção não extinguem totalmente as chances de uma descarga incidir diretamente sobre uma fase. Isso também não elimina completamente as chances de um curto-circuito devido à incidência de raios nas linhas de transmissão (vide descrição sobre o fenômeno do *blackflashover* explicado no capítulo anterior). Mas, tal proteção reduz bastante as chances de ocorrência de ambos, de forma que esta é considerada uma boa proteção e é vastamente utilizada, em geral, bem como especificada na norma IEEE Padrão 1243 [15], que é um guia para melhorar a performance das linhas de transmissão quanto às descargas atmosféricas.

Os cabos de guarda, geralmente têm seções circulares reduzidas em relação aos condutores de fases, e ficam localizados na região superior das linhas de transmissão, acima das fases. Eles têm como principal objetivo interceptar as descargas atmosféricas para que estas não atinjam as fases, e descarregá-las para o solo. Eles podem ser vistos na Figura 4.1, que é uma fotografia de uma linha de transmissão de 500 kV vinda da Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa, na chegada à estação de Furnas Samambaia, a principal entrada de energia elétrica de Brasília [25].

No projeto dos cabos de guarda, três fatores são de grande relevância: o material, o aterramento e a localização dos cabos. Os cabos devem ser resistentes à tração de seu próprio peso, às intempéries e às altas correntes principalmente as provenientes da incidência de uma descarga atmosférica. Deve ainda atentar-se ao aterramento desses cabos. Muitas vezes feito em conjunto com a torre, eletricamente solidário à torre, é o aterramento a porta de saída da descarga atmosférica que nele incide, e portanto este deve apresentar baixa impedância para que a proteção ocorra como o desejado. E por fim, a localização dos cabos. Desde os primórdios da utilização dos cabos de guarda, era empregado um ângulo de 30 graus com relação às fases externas. Isso funcionava muito bem para linhas de até 230 kV. Com o aumento da tensão das linhas e com o aumento da altura das estruturas, esse ângulo deve ser reduzido para manter a proteção devida, conforme definido na norma IEEE Padrão 1243 [24].

Os cabos de guarda podem ainda acumular outra função. Muitas vezes, são utilizados como cabos para-raio em linhas de transmissão, cabos construídos conforme especificado na norma IEEE Padrão 1138 [26]. Um cabo pode ter um núcleo contendo fibras ópticas de telecomunicações, envolvido por uma ou mais camadas de materiais condutores. Estes são os chamados cabos OPGW, do Inglês *Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire* (Fio Terra Elevado de Fibra Óptica Composta). Vale ressaltar que nessa configuração, isoladores de pequena resistência disruptiva são empregados entre os cabos e as torres, não alterando sua capacidade de proteção e nem de comunicação [15]. Esse tipo de cabo encontra-se ilustrado na Figura 6.1 abaixo.

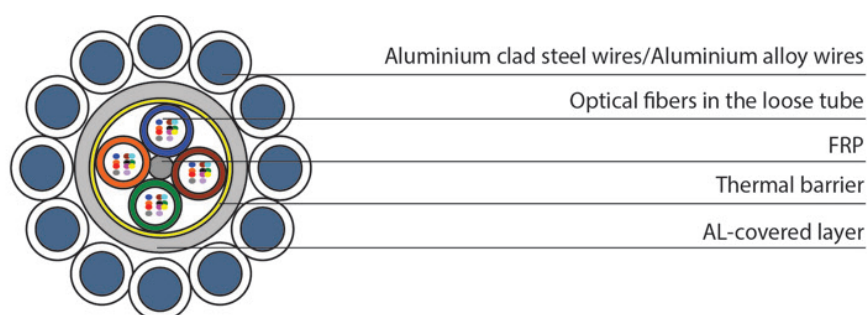


Figura 6.1. Cabo OPGW [27].

Dessa forma, os cabos de guarda podem acumular as funções de proteção e de comunicação. Essa configuração é bastante usada no Brasil. Furnas e Telebrás mantêm vários contratos quanto à utilização desses cabos para a comunicação visando estender o alcance das redes de comunicações no Brasil.

6.2. Considerações de Projeto Para Mitigar a Incidência das Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão

O IEEE em sua norma IEEE Padrão 1243 [24] elenca uma série de fatores de projeto de linhas de transmissão que apresentam influência de como estas respondem à descargas atmosféricas. Existem fatores que mitigam a incidência de descargas atmosféricas nas linhas, descritos nesta seção, e outros que mitigam os efeitos dessas quando incidem nas linhas, descritos na seção seguinte.

É relacionado à rota da linha que estão os parâmetros de projeto que influenciam na incidência de raios em linhas de transmissão. No design de uma linha, o projetista deve conectar dois pontos com um projeto que proporcione uma linha da forma mais econômica possível. Para isso, deve-se procurar ligá-los com a linha de comprimento mais curto possível. Existem ainda impedimentos ambientais e construtivos que podem interferir nisso.

Para diminuir as chances de incidência de raios nas linhas de transmissão, deve-se atentar primeiramente se o caminho por onde a linha está passando apresenta grande densidade de descargas atmosféricas e se há algum caminho alternativo com menor densidade. Outro fator que deve ser observado é o efeito da rota. Diferentes topologias, como topo de vales ou próximos a corpos de água, podem levar as linhas a diferentes níveis de exposição aos raios. Deve-se evitar colocar linhas no topo de montanhas, por exemplo. A altura da estrutura também é um fator importante aqui, portanto ambientes que permitam a utilização de estruturas de menor porte devem ser preferidos. E por fim, o ambiente adjacente também deve ser observado. Uma vez que objetos de grande porte nas proximidades, como árvores e o próprio relevo, podem atrair as descargas, evitando que essas atinjam a linha [15].

6.3. Considerações de Projeto Para Mitigar os Efeitos das Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão

A fim de mitigar os efeitos das descargas atmosféricas incidentes nas linhas de transmissão, a norma IEEE Padrão 1243 também apresenta um conjunto de decisões de projeto. Tais escolhas devem ser tomadas para buscar uma solução ótima entre a minimização dos custos de construção bem como das perdas financeiras que podem ser ocasionadas por causa de descargas atmosféricas.

A rota também apresenta papel importante neste cenário em dois aspectos. Primeiramente deve-se escolher um caminho cujo solo apresenta boa resistividade, uma vez que essa é a porta de saída de um raio incidente na linha e é essencial para evitar curto-circuitos [24]. O outro é que deve-se escolher caminhos de fácil acesso, para facilitar a manutenção em caso de surto.

A proteção também é um elemento muito importante para minimizar os efeitos das descargas atmosféricas que incidem em linhas de transmissão. A presença de cabos de guarda reduz consideravelmente as chances de um raio cair sobre uma fase da linha. Que por sua vez reduz as chances de que se forme um arco e um curto-circuito. Nesse sentido deve-se não apenas implementá-lo como também fazer a escolha correta do tipo de cabo, quantidade e posicionamento para a proteção ótima [24].

Os isoladores também devem ser levados em consideração. Estes devem ser capazes de resistir à sobretensões e não permitir a formação de arcos. Tal ocorrência resulta em falta, e prejudica o bom funcionamento do sistema [24].

É necessário ainda dar atenção ao aterramento. Sua função é escoar a corrente do impulso atmosférico. Para que os raios que atingem a estrutura ou os cabos de guarda sejam corretamente dissipados é importante que o aterramento apresente o caminho mais adequado para este. Além disso, possibilite fácil escoamento em direção à terra. Este processo depende da resistividade do solo no local [23, 18].

O aterramento se dá nas torres das linhas de transmissão. Ele é feito com cabos ou hastes, também chamados de cabos contrapeso, dispostos no solo. Em locais onde o solo apresenta baixa resistividade, o aterramento têm proporções mais compactas. Já quando a resistividade do solo é alta, é necessário utilizar sistemas de grandes proporções, e até mesmo arranjos especiais, como ilustrado na Figura 6.2 [18].

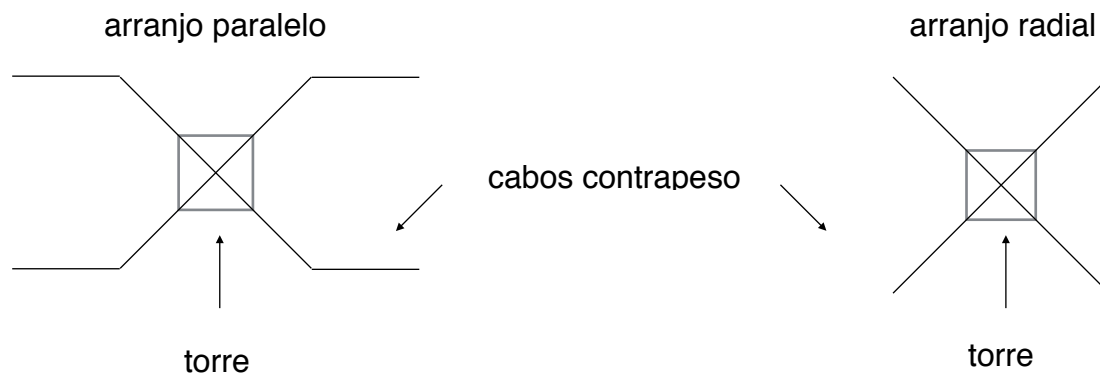


Figura 6.2. Arranjos Especiais Para Aterramento de Torres de LT [18].

7. PERDAS TÉCNICO-FINANCEIRAS E AVARIAS

Nos capítulos precedentes, foi apresentado um estudo teórico e crítico acerca das descargas atmosféricas, linhas de transmissão e sua interrelação, e uma análise de sistemas de proteção e prevenção. Foram explicitadas definições, conceitos, normas, entre outros, que possibilitam entender os tópicos abordados.

Neste capítulo, é feita uma análise técnica e também financeira baseada nos prejuízos no que tange à incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão. São abordados normas e procedimentos previstos por entidades gestoras do sistema elétrico brasileiro que regem a operação e fiscalização do sistema de transmissão, bem como as principais avarias as quais o sistema está sujeito nessa situação. Por fim, com base no Relatório de Análise: Desligamentos Forçados no Sistema de Transmissão, é realizado uma análise crítica acerca de um dos casos nele apresentados.

7.1. Diretrizes de Operação do Sistema de Transmissão

É parte importante de uma análise financeira, nesse setor, o balanço de possíveis penalidades que possam ser aplicadas. Nesse contexto, faz-se necessário então, conhecer os requisitos mínimos de operação impostos pelos órgãos que regem o sistema elétrico brasileiro.

Produzido pelo ONS, em conjunto com os agentes que integram o sistema elétrico do Brasil, um conjunto documentos chamado Procedimentos de Rede, apresenta detalhadas informações e dados básicos que regem o funcionamento desse sistema. Cada um dos 26 documentos que o constitui, chamados módulos, traz conhecimentos específicos relativos a algum tópico. Com relação ao foco desse trabalho, o módulo relevante é o de número 2, submódulo 4, que versa sobre os requisitos mínimos para linhas de transmissão aéreas, especialmente no que se refere à descargas atmosféricas.

É necessário para uma linha de transmissão, que seus cabos pára-raios, em condições de temperatura máxima média, radiação solar média e brisa mínima (menor que 1 metro por segundo) da região, seja capaz de suportar a corrente de curto-circuito monofásico franco, por duração igual ao tempo de atuação da proteção. E ainda, ao menos um dos cabos de guarda da linha deve ser do tipo OPGW [28].

Os Procedimentos de Rede ainda incluem como requisitos que o dimensionamento da LT, de forma a minimizar as chances de falha, atenda ao número mínimo de cabos de guarda sobre os condutores, conforme indicado na Tabela 7.1. E também, que para uma dada configuração de linha, o número de desligamentos provocados por descargas atmosféricas não ultrapasse um certo número, também especificado na tabela abaixo.

Tabela 7.1. Requisitos de Desempenho de uma LT a Descargas Atmosféricas [28]

Classe de Tensão [kV]	Número mínimo de cabos para-raios por estrutura	Desligamentos de um circuito por 100 km por ano	
		Devido à falha de blindagem	Total
≥ 345	2	0,01	≤ 1
230	2	0,01	≤ 2

7.2. Perdas Técnico-Financeiras: Normas, Penalidades e Fiscalização

A ANEEL, na qualidade de autarquia sob regime especial, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, tem a função de regular fiscalizar o sistema energético do país. E o faz por meio dos procedimentos e diretrizes descritos nas suas normas.

Dentre elas, a Resolução Normativa Número 63, de 12 de maio de 2004. Esta versa sobre os procedimentos para regular a imposição de penalidades aos agentes do sistema elétrico. Prevendo então encargos devido ao descumprimento de algumas diretrizes impostas pelos regentes do sistema, que visam o ótimo funcionamento deste.

Essa resolução prevê aplicações de penalidades aos que infringem seus artigos. Penalidades estas que vão desde advertência e multa, à caducidade da concessão ou permissão. Alguns dos seus trechos mais relevantes se encontram transcritos no Anexo A deste trabalho [29].

É possível ainda, em consulta à página virtual da ANEEL, acompanhar penalidades impostas aos agentes. A saber, algumas dessas penalidades encontram-se transcritas na Tabela 7.2. Tais informações encontram-se disponíveis em [19].

Tabela 7.2. Penalidades a Agentes de Transmissão [30].

Empresa	Natureza da Fiscalização	Data da Notificação	Penalidade (R\$)
CHESF	Técnica - Operação/Manutenção	13/08/2014	591.751,94
CHESF	Técnica - Ocorrência/Perturbações	25/06/2013	1.600.983,34
ELETRONORTE	Técnica - Operação/Manutenção	25/02/2016	303.103,96
ELETRONORTE	Técnica - Ocorrência/Perturbações	18/10/2013	5.016.488,66
FURNAS	Técnica - Operação/Manutenção	29/12/2016	1.525.706,92
FURNAS	Técnica - Operação/Manutenção	10/07/2014	391.206,90

Observa-se então que as penalidades observadas são de ordem de grandeza elevada. Podendo ainda ser agravada em caso de reincidência. Sendo assim, se faz necessário seguir de forma correta e contínua as normas, bem como observar e prezar sempre pelo bom funcionamento do sistema, com procedimentos de manutenção corretos e projetos bem feitos e executados.

7.3. Avarias: Componentes Potencialmente Afetados Pelas Descargas Atmosféricas

Além do potencial ônus financeiro gerado pela aplicação das penalidades descritas na seção anterior, uma linha de transmissão ainda está sujeita à um ônus material devido a danificação de componentes. Diversos componentes do sistema elétrico

estão sujeitos a isso, e alguns desses, se danificados podem chegar a causar desconexão de carga.

Como foi visto nos capítulos 2 e 5 deste trabalho, em alguns casos extremos as correntes provenientes das descargas atmosféricas podem atingir magnitudes da ordem de 400 kA. Estas, ao atingir componentes da linha de transmissão podem culminar em danos a estes. O mais comum nesse cenário é observar em elementos desprotegidos, despreparados ou frente a descargas atmosféricas de magnitudes muito elevadas, sofrerem danos térmicos. A Figura 7.1 ilustra uma cadeia de isoladores que sofreu danos térmicos devido a corrente de surto.

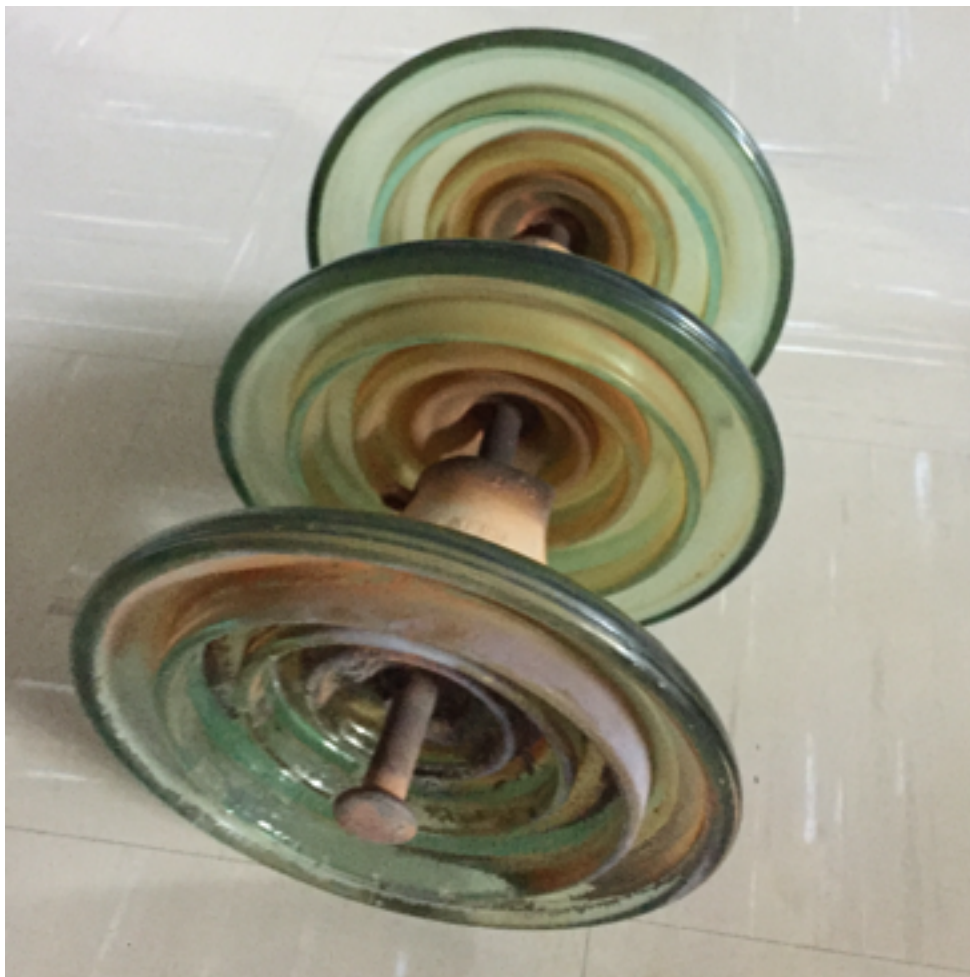


Figura 7.1. Avaria em Isolador Devido a Corrente de Surto.

Alguns dos componentes mais suscetíveis a este tipo de problema são os próprios cabos de guarda, que podem sofrer com a incidência de uma descarga e até vir a se romper em caso de projeto inadequado ou descarga além dos limites esperados. Ao mesmo problema estão sujeitos os cabos condutores de fase. Bem como os isoladores e até as estruturas. Equipamentos de medição, bancos de capacitor, etc. Todos esses podem ser danificados com a incidência de uma descarga atmosférica em linhas de transmissão. Até mesmo os equipamentos dentro de subestações de transmissão podem vir a apresentar avarias neste processo.

7.4. Análise de Caso

A ANEEL, em 2016, apresentou um relatório acerca dos desligamentos forçados no sistema de transmissão brasileiro. Reunindo informações de diferentes agentes do sistema elétrico, o relatório oferece um panorama dos desligamentos ocorridos na rede entre 01/08/2014 e 31/07/2015. Chamado "Relatório de Análise: Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão" ele se encontra disponível para acesso público no endereço eletrônico da ANEEL.

De acordo com o relatório, no período avaliado ocorreram 3.386 desligamentos, onde 2.481 deles ocorreram em linhas de transmissão. Destaca-se ainda que as descargas atmosféricas foram atribuídas como causa 15% de todos os desligamentos, um total de 486 por causa desse fenômeno [11]. Na Figura 7.2 encontra-se um gráfico com a distribuição das causas dos desligamentos analisados.

Das principais causas de desligamentos dos casos analisados, as falhas humanas têm participação de grande peso. E ainda, nota-se uma dificuldade no sistema elétrico brasileiro em geral em identificar as causas desses desligamentos. Um total de 28% de todos os casos presentes no relatório tiveram suas causas classificadas como indeterminada.

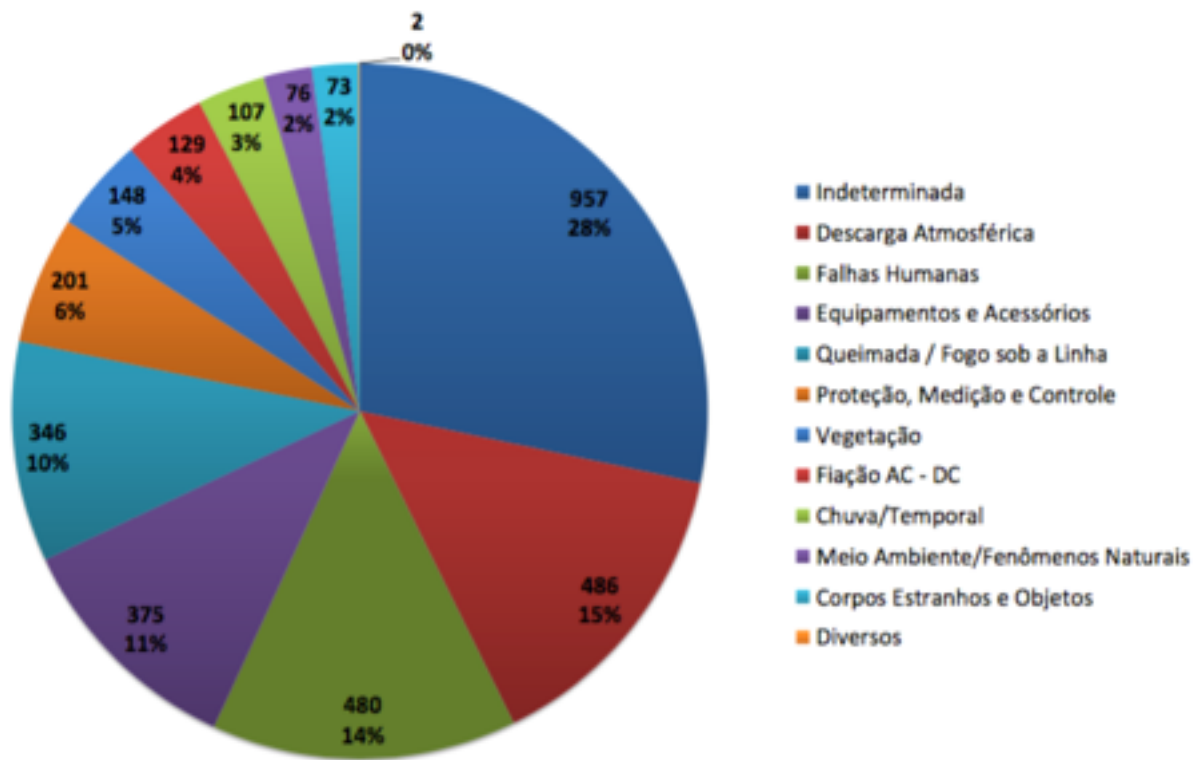


Figura 7.2. Distribuição das Causas dos Desligamentos Analisados [11].

Dentre os casos relatados, cabe citar o da linha de transmissão de 345 kV e 245 km de extensão, sem religamento automático, que liga a SE Corumbá à SE Brasília Sul. A Figura 4.2 deste trabalho é uma fotografia de uma torre desta linha de transmissão. Essa linha, em operação comercial desde março de 1997, pertencente ao sistema FURNAS, e está localizada geograficamente conforme a Figura 7.3.



Figura 7.3. LT 345 kV Corumbá /Brasília Sul GO/DF [31].

Com Adaptações.

O relatório aponta 15 desligamentos dentre os quais 4 foram atribuídas a descargas atmosféricas e 10 tiveram causas indeterminadas, conforme descrito na Tabela 7.3. Em seu relatório, a ANEEL reconhece que o número de desligamentos causados por descargas atmosféricas é expressivo, mas não prioritário. Foi dado mais relevância a melhorar a identificação das causas de desligamentos [11].

Tabela 7.3. Desligamentos na LT Corumbá /Brasília Sul [11].

Data	Local	Causa	Natureza Elétrica
9/8/14 0:43	Sem Localização Específica	Indeterminada	Fase-Terra
17/8/14 1:00	Sem Localização Específica	Indeterminada	Fase-Terra
25/8/14 5:19	Sem Localização Específica	Indeterminada	Fase-Terra
3/9/14 5:19	Sem Localização Específica	Indeterminada	Fase-Terra
14/10/14 17:52	Sem Localização Específica	Indeterminada	Fase-Terra
14/10/14 18:27	Sem Localização Específica	Indeterminada	Fase-Terra
20/11/14 22:31	Sem Localização Específica	Indeterminada	Fase-Terra
7/12/14 21:21	Sem Localização Específica	Descarga Atmosférica	Fase-Terra
21/12/14 21:00	Sem Localização Específica	Descarga Atmosférica	Fase-Terra
22/1/15 6:55	Proteção	Erro de Ajuste - Cálculo	Fase-Terra
5/2/15 20:42	Sem Localização Específica	Descarga Atmosférica	Fase-Terra
5/4/15 13:20	Sem Localização Específica	Descarga Atmosférica	Fase-Terra
20/4/15 3:36	Sem Localização Específica	Indeterminada	Fase-Terra
23/6/15 23:34	Sem Localização Específica	Indeterminada	Fase-Terra
30/7/15 3:11	Sem Localização Específica	Indeterminada	Fase-Terra

Porém para uma linha de 245 km de extensão, e tensão nominal de 345 kV, o número máximo de desligamentos causados por este fenômeno não poderia ser maior que 3 no período de um ano. Desrespeitando portanto o que diz o submódulo 2.4 dos Procedimentos de Rede, já mencionado neste trabalho.

Dessa forma, FURNAS descumpre o artigo 6º, incisos VIII, XV e XVI, da norma 63/2004 da ANEEL (Anexo A deste trabalho). Caracteriza-se então ato de infração e FURNAS torna-se passível de multa. Segundo o artigo 14, o valor dessa penalidade pode assumir até 1% do faturamento de Furnas no ano anterior [29].

No entanto, dos 4 casos relatados com causa atribuída às descargas atmosféricas, não foram encontrados registros de danos a equipamentos.

8. CONCLUSÃO

8.1. Aspectos Gerais

As descargas atmosféricas são fenômenos presentes nas diversas regiões do mundo. Suas características são por muitos desconhecidas, mas é censo comum o alto poder destrutivo deste fenômeno. Com sua intensidade a média global de 30 kA, como foi citado neste trabalho, essa característica fica constatada e evidente.

Parte importantíssima do processo com que a energia elétrica chega aos consumidores finais, as linhas de transmissão tendem a ter grande impacto com este fenômeno natural. Suas características físicas como altura elevada e predominância de materiais condutores fazem com que este elemento do sistema elétrico seja um alvo fácil para as descargas atmosféricas.

As descargas atmosféricas são, portanto, conhecidas causas de problemas no fornecimento de energia. Sobreensões e ondas de corrente viajantes pela linha devido a este fenômeno são capazes de causar grandes danos aos componentes, como danos térmicos, bem como ao fornecimento de energia, com curto-circuitos. Preocupadas com a qualidade no fornecimento de energia elétrica, pesquisas e investimentos estão sendo voltados a investigar este fenômeno e sua relação com as linhas de transmissão e a qualidade de energia.

8.2. Principais Conclusões Encontradas

Ao atingir uma linha de transmissão, a descarga atmosférica provoca o aparecimento de uma corrente de impulso atmosférico. Essa corrente se divide em duas no ponto de incidência e duas ondas idênticas se propagam pela linha. Podendo este ponto ser nos condutores de fase, cabos de proteção ou até mesmo na estrutura.

Nos projetos bem elaborados, grande chance há de uma descarga incidir nos cabos de guarda ou na torre e corrente de impulso ser corretamente escoada por meio do aterramento da estrutura. Em caso de falhas de projeto ou descargas de perfil não esperado, ao atingir os cabos de guarda ou torre podem ainda causar falha no isolamento, implicando em danos a ele e curto-circuito. Podem ainda causar ruptura dos cabos de guarda e danos a torre. E em caso de falha no projeto dos cabos de guarda, a descarga pode até mesmo atingir diretamente os condutores de fase.

No contexto deste trabalho fica clara a necessidade de atenção especial à incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão. Seja por danos em equipamentos, componentes, falta no fornecimento ou posteriores penalidades provenientes de fiscalização. É evidente o grande potencial de causar avarias e perdas financeiras no setor elétrico.

A proteção das linhas de transmissão é feita principalmente com o uso de cabos de guarda. Componente que desempenha seu papel com eficiência quando bem projetados, instalados em quantidade e posicionamento correto com o cabo adequado. Vale ressaltar que este componente sozinho não extingue os perigos das descargas atmosféricas às linhas de transmissão. Associado a ele é imprescindível que o aterramento da torre seja bom, com baixa resistência, para que a corrente de descarga possa ser escoada. E ainda, que os isoladores sejam bem dimensionados para que não ocorra a sua falha provocando o curto-circuito.

Várias normas regulam o uso de equipamentos de proteção de linhas de transmissão contra as descargas atmosféricas. Estas normas acabam por oferecer maiores níveis de segurança aos equipamentos e à qualidade de energia. Tais procedimentos melhoram a resiliência das linhas mas não chegam a perfeição, podendo ainda ter problemas com este fenômeno, como visto em um grande número de casos do relatório da ANEEL.

Escolhas críticas de projeto devem ser levadas em consideração, e uma análise técnico-econômica deve ser feita nesta etapa. Visando sempre que a linha ligue dois pontos com o menor custo possível, é importante se atentar que as consequências da incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão podem ser severas, com grande potencial de avarias em equipamentos e até consequente penalização por parte da fiscalização do setor.

Por fim, vale ressaltar que faz-se necessário então a observância continua e conjunta, dos equipamentos, procedimentos de manutenção e meteorologia. Para que na interseção desses conhecimentos possa se chegar a melhores níveis de confiabilidade da rede. E mesmo em casos extremos, não ter ônus devido à penalidades ou perdas materiais, bem como manter sempre o funcionamento do sistema elétrico como um todo.

8.3. Sugestões Para Trabalhos Futuros

A partir deste trabalho, existe a perspectiva de continuidade à esta linha de pesquisa com diversos temas relacionados. Alguns deles são:

- Descargas atmosféricas e o sistema de distribuição: avarias e perdas financeiras.
- Incidência de descargas atmosféricas em subestações.
- Efeitos de descargas atmosféricas em linhas de transmissão sem proteção contra descargas atmosféricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GLOVER, J. DUNCAN, SARMA, MULUKUTLA S., OVERBYE, THOMAS. **Power System Analysis and Design SI Edition**. Estados Unidos: Cengage Learning, Edição 5, 2012.
- [2] Disponível em: <http://www.eletrosul.gov.br/files/images/nosso-negocio/transmissao/transmissao.jpg> Acesso em Novembro, 2016.
- [3] Disponível em <http://energy.gov/articles/top-9-things-you-didnt-know-about-americas-power-grid> Acesso em Novembro 2016.
- [4] SALARI FILHO, J. C. **Efeito das Descargas Atmosféricas no Desempenho das Linhas de Transmissão - Modelagens no Domínio do Tempo e na Frequência**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2006.
- [5] NBR 5419 - **Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas**. Norma técnica ABNT, Brasil, 2015.
- [6] Disponível em: <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=85600>, Acesso em Novembro, 2016.
- [7] Albrecht, R., S. Goodman, D. Buechler, R. Blakeslee, and H. Christian. **Where are the lightning hotspots on Earth?** Estados Unidos: Amer. Meteor. Soc., 2006.
- [8] SADIKU, MATTHEW N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. Porto Alegre: Bookman, Edição 5, 2012.
- [9] Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/tempestades/conceitos.meteorologicos.php/> Acesso em Novembro, 2016.

- [10] GRIGSBY, LEONARD L. **The Electrical Engineer Handbook, Electric Power Generation, Transmission, and Distribution**. Estados Unidos: CRC Press, Edição 3, 2012.
- [11] Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Relatório de Análise: Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão**. Agência Nacional de Energia Elétrica - Brasília : ANEEL, 2016.
- [12] Disponível em: http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx Acesso em Novembro, 2016.
- [13] Disponível em: http://www.ons.org.br/institucional/agentes_transmissao.aspx Acesso em Novembro, 2016.
- [14] DAMASCENO, F. **Análise de Sistemas de Potência**. Brasil: Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2015.
- [15] FUCHS, RUBENS D. **Transmissão de Energia Elétrica, Linhas Aéreas, Teoria da Linhas em Regime Permanente**. Rio de Janeiro: LTC/EFEL, Volume 1, 1977.
- [16] Disponível em: <http://www.power-technology.com/features/featurethe-worlds-longest-power-transmission-lines-4167964/> Acesso em Novembro, 2016.
- [17] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Norma Técnica 0075/2011-SRD/ ANEEL de dezembro de 2011
- [18] ZANETTA, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 2003.
- [19] Eletronorte - Centrais Elétricas do Norte do Brasil. **O Que Você Precisa Saber Sobre Linhas de Transmissão**.

[20] Disponível em: http://www.furnas.com.br/arqtrab/ddpppg/revistaonline/linhadireta/rf321_sinali.pdf Acesso em Novembro, 2016.

[21] IEEE Standards. **1410 IEEE Guide for Improving Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines**. Estados Unidos: IEEE, 2004.

[22] Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/caracteristicas.da.corrente.eletrica.php> Acesso em Novembro, 2016.

[23] CUNHA, L. V. **Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas: Influência do Efeito Corona Na Ruptura a Meio Vão**. Brasil: UFMG, 2010.

[24] IEEE Standards. **1243 IEEE Guide for Improving Lightning Performance of Transmission Lines**. Estados Unidos: IEEE, 1997.

[25] Disponível em: <http://www1.furnas.com.br/hotsites/anuario2011/lupa.html> Acesso em Novembro, 2016.

[26] IEEE Standards. **1138 IEEE Standard Construction of Composite Fiber Optic Overhead Ground Wire (OPGW) for Use on Electric Utility Power Lines**. United States, IEEE, 1994 Revision.

[27] Disponível em: <http://zttcable.com/Product/Index?Id=45b36d9e-0085-4bb0-adf5-e059f9dacc94> Acesso em Novembro, 2016.

[28] Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS. **Procedimentos de Rede**. ONS, Brasil, 2009.

[29] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Resolução Normativa 63/2004**. Brasil, 2004.

[30] Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/relatoriosrig/\(S\(lbq4izmxyfxgo4grx4l5orzu\)\)/relatorio.aspx?folder=sfe&report=FiscalizacoesSFE-SIGEC-2](http://www2.aneel.gov.br/relatoriosrig/(S(lbq4izmxyfxgo4grx4l5orzu))/relatorio.aspx?folder=sfe&report=FiscalizacoesSFE-SIGEC-2) Acesso em Novembro, 2016.

[31] Disponível em: <http://betasindat.ons.org.br/SINDAT/Home/ControleSistema> Acesso em Novembro, 2016.

ANEXOS

ANEXO A - Principais Trechos da Norma 63/2004 ANEEL.

RESOLUÇÃO NORMATIVA No 63, DE 12 DE MAIO DE 2004.

Aprova procedimentos para regular a imposição de penalidades aos concessionários, permissionários, autorizados e demais agentes de instalações e serviços de energia elétrica, bem como às entidades responsáveis pela operação do sistema, pela comercialização de energia elétrica e pela gestão de recursos provenientes de encargos setoriais.

Capítulo I DAS INFRAÇÕES E SANÇÕES

Seção I Da Advertência

Art. 3º Constitui infração, sujeita à imposição da penalidade de advertência:

- I – deixar de prover as áreas de risco, definidas na legislação, especialmente no Anexo do Decreto nº 93.412, de 14.10.86, da instalação de sinalizadores e avisos de advertência de forma adequada à visualização de terceiros;
- IX – deixar de manter normas e instruções de operação atualizadas nas instalações e/ou centros de operação de geração, transmissão, transformação e distribuição de energia elétrica;

Seção II Da Multa

Art. 4º Constitui infração, sujeita à imposição da penalidade de multa do Grupo I:

- XV - deixar de utilizar equipamentos, instalações e métodos operativos que garantam a prestação de serviço adequado;

Art. 5º Constitui infração, sujeita à imposição da penalidade de multa do Grupo II:

- VI - deixar de efetuar, nos prazos estabelecidos, reparos, melhoramentos, substituições e modificações, de caráter urgente, nas instalações;
- VIII - descumprir as regras e procedimentos estabelecidos para a implantação ou operação das instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica;

Art. 6º Constitui infração, sujeita à imposição da penalidade de multa do Grupo III:

- I - descumprir as disposições legais, regulamentares e contratuais relativas aos níveis de qualidade dos serviços e do fornecimento de energia elétrica;
- VIII – deixar de manter segurados, em valores e condições suficientes, suportados por estudos técnicos, os bens e as instalações que, por razões de ordem técnica, sejam essenciais à garantia e confiabilidade do sistema elétrico;
- XIV - operar ou manter as instalações de energia elétrica e os respectivos equipamentos de forma inadequada, em face dos requisitos legais, regulamentares e contratuais aplicáveis;
- XV – provocar desligamento ou permitir a sua propagação no sistema elétrico em decorrência de falha de planejamento ou de execução da manutenção ou operação de suas instalações;
- XVI – deixar de observar os Procedimentos de Rede aprovados pela ANEEL;

Art. 7º Constitui infração, sujeita à imposição da penalidade de multa do Grupo IV:
XVIII – ultrapassar o Padrão de Frequência de Outros Desligamentos, conforme art. 4o da Resolução Normativa no729, de 28 de junho de 2016;

Art. 8o A penalidade de multa capitulada nos arts. 4o, 5o, 6o e 7o desta Resolução poderá ser convertida em advertência, desde que:

I – a infratora não tenha sido autuada por idêntica infração nos últimos quatro anos anteriores ao da sua ocorrência; e

II – as consequências da infração sejam de pequeno potencial ofensivo.

DOS CRITÉRIOS PARA FIXAÇÃO DAS MULTAS

Art. 14. Sem prejuízo do disposto em regulamento específico ou contrato de concessão, os valores das multas serão determinados mediante aplicação, sobre o valor do faturamento, nos casos de concessionários, permissionários e autorizados de instalações e serviços de energia elétrica, ou sobre o valor estimado da energia produzida, nos casos de auto-produção e produção independente, correspondente aos últimos doze meses anteriores à lavratura do Auto de Infração, dos seguintes percentuais:

Grupo I: até 0,01% (um centésimo por cento);

Grupo II: até 0,10% (dez centésimos por cento);

Grupo III: até 1% (um por cento);

Grupo IV: até 2% (dois por cento).

Art. 16. Ocorrendo a reincidência, proceder-se-á da seguinte forma:

I - aplicar multa correspondente ao Grupo I, para os casos anteriormente puníveis com advertência;

II - aplicar acréscimo de cinquenta por cento sobre o valor da multa, limitado o montante ao percentual de dois por cento, de que trata o art. 14 desta Resolução.

§ 1º Entende-se por reincidência, para os fins de agravamento de penalidade de que trata este artigo, a repetição de falta de igual natureza no período de doze meses após a decisão irrecorrível na esfera administrativa.